



# Remoción de arsénico en aguas subterráneas de Morelia mediante un proceso de oxidación-coagulación-floculación-filtración

Arsenic removal from groundwater in Morelia using an oxidation-coagulation-flocculation-filtration process.

Álvaro Ilich Lira García <sup>1</sup>, María del Carmen Cano Correa <sup>2</sup>, Julio César Orantes Ávalos <sup>3</sup>

<sup>1</sup> PILIA, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; Úkua Lab.

<sup>2</sup> Organismo Operador de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (OOAPAS) de Morelia.

<sup>3</sup> Facultad de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

## Resumen

En la actualización de la NOM-127-SSA1-2021 (SS, 2022) se establecieron límites máximos permisibles más estrictos para el agua de uso y consumo humano, en parámetros como el arsénico, el cual puede ocasionar graves afecciones a la salud y se ha encontrado presente en algunas fuentes de abastecimiento subterráneas de la ciudad de Morelia. El presente proyecto propone un proceso de oxidación-coagulación-floculación-filtración para su remoción. Se evaluaron parámetros como pH, conductividad eléctrica, turbiedad, color, fluoruros y aluminio. Se realizaron ensayos de pruebas de jarras con 6 mg/L de sulfato de aluminio y 2 mg/L de policloruro de aluminio y, probando 3 filtros: (i) arena sílica, (ii) carbón activado y (iii) arena sílica, zeolita y carbón activado. Los resultados muestran que el tratamiento con el filtro combinado (iii) alcanza una eficiencia de remoción de hasta el 90% de arsénico.

**Palabras clave:** arsénico, oxidación-coagulación-floculación-filtración, fuentes subterráneas de abastecimiento de agua potable, calidad del agua.

## Abstract

In the modification to NOM-127-SSA1-2021 (SS, 2022), stricter maximum permissible limits were established for human consumption water parameters, such as arsenic, a contaminant that could cause severe health issues and that has been found in some underground water supply sources in the city of Morelia. The present project proposes an oxidation-coagulation flocculation-filtration process for its removal. Parameters such as pH, electrical conductivity, turbidity, color, fluorides, and aluminum, were evaluated. Jar tests were conducted using 6 mg/L of aluminum sulfate and 2 mg/L of polyaluminum chloride as reagents. Three different filters were tested: (i) silica sand, (ii) activated carbon, and (iii) silica sand, zeolite, and activated carbon. The results show that the water treatment with the combined filter (iii) achieves a removal efficiency of up to 90% of arsenic.

**Keywords:** arsenic, oxidation-coagulation-flocculation-filtration, groundwater sources for water supply, water quality.

## Introducción

La calidad del agua en las fuentes de abastecimiento de agua potable se encuentran cada vez en condiciones más críticas. Hay incremento de la población mundial, las extracciones de agua subterránea siguen en aumento y estos ha generado mayor demanda en el grado de presión sobre los recursos hídricos del mundo (CONAGUA, 2019). Cada vez son más países los que están sometidos a estrés hídrico, por la poca disponibilidad de agua potable, la cual está destinada en un 72% a la agricultura, mientras que los municipios utilizan el 12% para los hogares y servicios, y las industrias utilizan el 16% (FAO, 2023). La calidad del agua puede verse comprometida por determinadas concentraciones de posibles contaminantes de

### Historial

Manuscrito recibido: 31 de octubre de 2025

Manuscrito aceptado: 19 de abril de 2026

Manuscrito publicado: agosto de 2026

### ✉ Autor para correspondencia

Julio César Orantes Ávalos

[julio.orantes@umich.mx](mailto:julio.orantes@umich.mx)

### Como citar

Lira García AI, Cano Correa MC, Orantes-Ávalos JC (2026). Remoción de arsénico en aguas subterráneas de Morelia mediante un proceso de oxidación-coagulación-floculación-filtración. *Ciencia Nicolaita* 97:148-156. DOI:[10.35830/cn.vi97.947](https://doi.org/10.35830/cn.vi97.947)

origen biológico y fisicoquímico que alteran su composición y supone un riesgo a la salud de quien la consuma; entre las mayores amenazas a la calidad del agua está el

grupo de los metales pesados, donde el arsénico (As) ha tomado relevancia ya que cada vez es más frecuente encontrarlo en fuentes de abastecimiento subterráneas para consumo humano. Se trata de un elemento que puede presentarse en el agua por procesos naturales de disolución de minerales, meteorización química, o bien, ser introducido por contaminación antrópica debido a actividades como la minería, uso de plaguicidas, etc. Su límite permisible fue inicialmente de 0.05 mg/L, establecido formalmente en 1975 por National Interim Primary Drinking Water Regulations (NIPDWRs) y fue hasta el año 2001 que la USEPA publicó el límite para arsénico de 0.010 mg/L. (EPA, 2003), luego de haber dirigido las investigaciones sobre los efectos a la salud que producía este metal. Este mismo valor fue recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) al definirlo como agente tóxico y carcinógeno, además de producir vómitos, diarrea y en casos extremos, la muerte (OMS, 2022). Otros estudios recientes expusieron efectos a largo plazo sobre la piel y en los sistemas cardiovascular y digestivo (De la Rosa, 2018). En el caso de México, la actualización de la NOM-127-SSA1-2021 (SS, 2022) trajo cambios en los límites permisibles de muchos parámetros. Es así como el arsénico, redujo su límite permisible de 0.025 mg/L (en su versión de 1994) a 0.01 mg/L.

En la República Mexicana se tiene definidos 653 acuíferos y aproximadamente el 38.7% del agua utilizada en el país proviene de estas fuentes (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2019). Por otro lado, la detección de arsénico en acuíferos de la República Mexicana se ha logrado con estudios de la CONAGUA, los cuales han identificado tres ambientes hidrogeológicos donde se presentan altas concentraciones de arsénico en el agua subterránea de México, Arreguín *et al.*, s.f. (citado en Smedley, 2003) marca los acuíferos aluviales del norte y centro de México, áreas mineras en distintas zonas y aguas geotérmicas asociadas a rocas volcánicas en el centro de la República Mexicana. En México, acuíferos de Coahuila, Chihuahua, Durango, Guanajuato, San Luis Potosí y Zacatecas presentan concentraciones superiores a los 0.025 mg/L (Vitela, 2011).

La zona de estudio se encuentra en la ciudad de Morelia, dentro del acuífero de Morelia-Queréndaro pertenece a la Cuenca Lerma-Santiago-Pacífico y es jurisdicción territorial de la Dirección Local Michoacán. Su territorio se encuentra totalmente vedado y sujeto a las disposiciones de cuatro decretos de la CONAGUA (2023). Al momento del estudio se tenía registro de 20 fuentes de abastecimiento con concentraciones de arsénico superiores a 0.01 mg/L, siendo pozos profundos en su totalidad. La perforación de nuevos pozos junto a la creciente demanda

y explotación en las fuentes actuales puede dar lugar a un incremento en la concentración de arsénico (Smith *et al.*, 2018).

Si bien no hay un estudio que describa los mecanismos geoquímicos que generan arsénico en el acuífero de Morelia-Queréndaro, se sabe que su presencia se extiende en pozos de la región cuya geología corresponde a un contexto volcánico y la literatura describe procesos geogénicos que liberan arsénico en el agua subterránea, como ocurre en los acuíferos de la cuenca Lerma-Chapala donde el arsénico liberado se asocia a la disolución de minerales (Ortega-Guerrero, 2009).

El presente trabajo evalúa la eficiencia del proceso de Oxidación-Coagulación-Floculación-Filtración en la remoción de arsénico de fuentes de abastecimiento de aguas subterráneas en la ciudad de Morelia, en cumplimiento con los límites máximos permisibles de la NOM-127-SSA1-2021 (SS, 2022), teniendo en cuenta el contexto en el que se desarrolla la zona de estudio, con el acuífero de Morelia en sobreexplotación, reflejándose en los pozos subterráneos cuyos caudales rondan los 8 L/s, además de la disponibilidad de espacio que hay, dado que en las instalaciones que rodean a los pozos de abastecimiento suelen estar reducidas y, finalmente, con base en un presupuesto limitado con el que cuenta el Organismo Operador.

El arsénico presenta cuatro estados de oxidación, dependiendo de las condiciones de óxido reducción del agua y del pH de esta: arsenato (V), arsenito (III), arsina (-III) y su estado elemental (Aviles, 2016). Las constantes de disociación para el As (V) son menores que las del As (III), por lo que su grado de disociación es más elevado. Esto quiere decir que su capacidad de ionización le permite combinarse con otros compuestos, por lo que la remoción del As (V) es más eficiente, en comparación con la del As (III), por ello la importancia de oxidar al arsenito antes de tratar el agua.

Aunque no se ha determinado la tecnología más adecuada para la remoción de arsénico en su forma arsenato (V), existen alternativas diversas. Por un lado, está el uso de medios de adsorción, de los cuales destacan el carbón activado, alúmina activada y adsorbentes a base de óxido de hierro (Borjon *et al.*, 2021). Otro método sencillo y de bajo costo es el intercambio iónico, proceso en el que la solución se pasa a través del lecho hasta que se satura y se da la fuga de contaminantes, luego la resina se reactiva con una solución que lleva los contaminantes retenidos para disposición como efluente (D' Ambrosio, 2005). Uno de los métodos más eficaces y costosos es la ósmosis inversa, un proceso de filtración con membranas semipermeables donde se somete el agua a presión, permitiendo su paso

y reteniendo los contaminantes, logrando disminuir tanto parámetros microbiológicos como fisicoquímicos (Guevara *et al.*, 2022) y siendo capaces de remover tanto  $A^{+3}$  y  $As^{+5}$  sin necesidad de oxidación previa (Esparza, 2006). Sin embargo, una gran desventaja es el rechazo del caudal de alimentación que puede ser de hasta un 50% (Sáenz, 2019).

El proceso de Coagulación y Floculación consiste en la adición de coagulantes para atrapar las partículas de arsénico en la formación de flóculos y facilitar su remoción a través de sedimentación o filtración. Martínez *et al.*, (2018) explican cómo ha incrementado el estudio de la adsorción de arsénico con materiales como zeolitas, arcillas, entre otros. Este proceso ha sido comúnmente utilizado en contextos reales, tal como se ha visto en el tratamiento de aguas de Chile desde los años setenta (Sancha, 1999).

La combinación seleccionada integra el proceso de coagulación-floculación con otro de oxidación y finalmente una filtración, que se adecúa a los requisitos de costos bajos, aplicación sencilla y poco espacio requerido. Mientras que técnicas como la dilución puede reducir temporalmente la concentración de arsénico, este continúa presente en el sistema acuífero y su concentración puede variar en función de la explotación, por lo que solo puede ser una medida de manejo transitoria.

Sancha (1999) explicó el tratamiento aplicado en una planta de tratamiento de Salar del Carmen, Antofagasta, Chile, donde el agua cruda entra por una preoxidación con gas cloro, luego coagulación con cloruro férrico, después la floculación, sedimentación y una doble filtración, finalizando con una postoxidación, obteniendo remociones del 90%. Por otro lado, Francisca y Carro (2014) aplicaron una preoxidación para mejorar la remoción y encontraron un rango de dosificación de sulfato de aluminio entre 5 a 50 mg/L, donde se alcanzan las mayores eficiencias y después, por exceso del mismo reactivo, decrece la remoción. Aplicaron diferentes concentraciones de arsénico, pero en su mayoría alcanzaron el 80% de remoción. Autores como Estrada y Szarata (2016) realizaron pruebas con agua subterránea del municipio de San Rafael Las Flores, en Guatemala, utilizando una dosificación de 25 mg/L de sulfato de aluminio al 1%, a lo que también sugirieron seguir el proceso con sedimentación y/o filtración. Obtuvieron una eficiencia de remoción de hasta el 68%.

En un caso que exploró aplicaciones domiciliarias, Aviles (2016) aplicó un método de Coagulación-Oxidación con arcilla natural para un prototipo intradomiciliario con agua de Huautla, Morelos y Zimapán, Hidalgo, utilizando 80 mg/L de sulfato de aluminio, 100 mg/L de arcilla verde natural y 0.5 mg/L de hipoclorito de calcio. Aunque logró una eficiencia de hasta el 93% de remoción

de arsénico, no da cumplimiento en todos los parámetros, primordialmente Aluminio, cuyo valor residual excede la normativa vigente.

## Materiales y métodos

Primeramente se recopiló la información sobre la caracterización del agua en las fuentes subterráneas, de los 20 pozos en los que se ha registrado presencia de arsénico al momento del estudio, se seleccionaron 13 pozos representativos, distribuidos en distintos puntos de la ciudad de Morelia. Con base en esta información de calidad del agua de las fuentes de abastecimiento se buscó un proceso de tratamiento de bajo costo y efectivo para remover el metal de estudio.

### Elaboración del filtro

La función básica del filtro es permitir el paso del agua limpia mientras que retiene los contaminantes presentes en la muestra, así como reducir la turbiedad y color. Para su elaboración se eligieron tres alternativas, tomando en cuenta la disponibilidad de los materiales con las que contaba el Organismo Operador y sus características para retención, siendo:

- Carbón activado.
- Arena sílica.
- Zeolita.

Se ensamblaron tres filtros usando tubos reutilizables con tapaderas y taladrando agujeros para permitir el flujo del agua. A esta base se le colocó malla y se sujetó con abrazaderas. Para el material filtrante, se hicieron lavados para eliminar cualquier suciedad que tuvieran y se secaron antes de depositarlos en los filtros.

Los tres filtros con tubos PVC tuvieron una altura de 50 cm y un diámetro de 5 cm, compuestos por:

- **Filtro de carbón activado (CA).** Compuesto por una capa de 40 cm de carbón activado con tamaño de 0.95 mm a 1.1 mm.
- **Filtro de arena sílica (AS).** Compuesto por una capa de 40 cm de arena sílica con tamaño de grano de 1.5 mm a 2.0 mm.
- **Filtro de carbón activado, arena sílica y zeolita (CAZ).** Compuesto por tres capas estratificadas. En la

base hay una capa de 15 cm de zeolita (1.0 mm a 1.5 mm); en el medio, 15 cm de carbón activado (0.95 mm a 1.1 mm); y, en la parte superior, 10 cm de arena sílica (1.5 mm a 2.0 mm).

### Toma de muestras

Los muestreos se realizaron tomando como referencia la NOM-230-SSA1-2002 (SS, 2005). Para la toma de muestras en pozos profundos, la norma indica que se debe tomar de la válvula, siempre y cuando se hayan removido los aditamentos exteriores y se haya asegurado de que no hay fugas y el agua debe provenir directamente del sistema de distribución. Recolectadas las muestras con frascos de polietileno, sin dejar burbujas de aire, se colocan en hieleras, cubiertas con hielo para su transporte al laboratorio, manteniendo temperaturas entre 4 °C y 10 °C. El tiempo que debe pasar para el análisis de las muestras dependerá del tipo de parámetro, que puede variar de horas a meses, según sea microbiológico, fisicoquímico, etc.

### Prueba de jarras

Para la obtención de los reactivos eficaces y las dosis óptimas para cada uno, se hicieron pruebas de jarras con varias iteraciones hasta obtener las medidas ideales, siguiendo el procedimiento descrito a continuación:

1. Llenado de seis jarras de 2 L cada una con la muestra del pozo de abastecimiento.
2. Preparación de distintas dosis de oxidante, coagulante y floculante para cada jarra.
3. Agitación rápida definida a 175 rpm durante 3 minutos.
4. Agitación lenta definida a 35 rpm durante 3 minutos.
5. Adición de oxidante al comienzo del proceso; posteriormente, se añade el coagulante al primer minuto de la mezcla rápida y, finalmente, el floculante al segundo minuto.
6. Terminado el conteo, se sometieron a una filtración con un filtro de 30 cm compuesto de antracita y papel filtro.
7. Se almacenan las muestras junto a un frasco control de agua cruda y se preservan, de ser necesario, según el análisis a realizar.
8. Se llenan las etiquetas de identificación y los docu-

mentos correspondientes (check list, cadena de custodia, etc) para llevar el control en el laboratorio.

9. Se analiza el parámetro de interés, es decir, el arsénico, mediante espectrometría de absorción atómica.
10. Se comparan los resultados entre la muestra sin tratamiento y las tratadas a diferentes dosis.
11. Se realizan iteraciones modificando los reactivos y las dosis, bajo los mismos parámetros de operación.

Se probaron diversos reactivos como hipoclorito de sodio (NaClO), cloruro férrico (FeCl<sub>3</sub>), sulfato de aluminio (Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>), policloruro de aluminio (PAC) y polímero, determinando los oxidantes, coagulantes y floculantes necesarios. Durante las pruebas, se definieron las concentraciones de reactivos a manejar con la siguiente fórmula:

$$C_1 V_1 = C_2 V_2 \quad (1)$$

Donde  $C_1$  representa la concentración del reactivo y  $V_1$  el volumen de la dosis, mientras que  $C_2$  es la concentración de la dosis y  $V_2$  el volumen de la jarra.

### Determinación de parámetros de calidad.

Después de tener los reactivos y dosis adecuados, comienzan las pruebas en los pozos seleccionados, a los que se aplicarán las mismas dosis, con la diferencia en que se asignan a cada 2 jarras, uno de los filtros, para comprobar sus eficiencias en cada parámetro de interés.

Todos los parámetros medidos forman parte de la NOM-127-SSA1-2021 (SS, 2022), junto a los límites permisibles establecidos (**Tabla 1**). Fueron elegidos por la relación directa o indirecta que tienen con el contaminante de estudio o con las características del agua.

## Resultados y discusiones

Los primeros resultados importantes fueron aquellos obtenidos para determinar los reactivos a utilizar. Se iniciaron las pruebas de jarras utilizando como posibles oxidantes al hipoclorito de sodio y cloruro férrico; para los coagulantes se manejaron sulfato de aluminio, y polímero; en cuanto al floculante, se utilizó PAC. Todos estos reactivos se eligieron por ser aquellos ya utilizados en los procesos de la planta potabilizadora.

Hechas las pruebas, se determinó que reactivos como el cloruro férrico añadían hierro residual que superaba los límites de la norma, considerando que dentro del contexto

**Tabla 1.** Metodologías utilizadas para el análisis de cada parámetro.

| Parámetro               | Equipo utilizado         | Método de análisis     | LMP                      |
|-------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|
| pH                      | Multiparamétrico         | NMX-AA-008-SCFI-2016   | 6.5 a 8.5 unidades de pH |
| Conductividad eléctrica | Multiparamétrico         | NMX-AA-093-SCFI-2018   | No tiene                 |
| Arsénico                | Absorción atómica        | NMX-AA-051-SCFI-2016   | 0.01 mg/L                |
| Aluminio                | Absorción atómica        | NMX-AA-051-SCFI-2016   | 0.2 mg/L                 |
| Turbiedad               | Turbidímetro             | NMX-AA-038-SCFI-2001   | 3 UNT                    |
| Color                   | Colorímetro              | Método Estándar 2120-C | 15 UC                    |
| Fluoruros               | Espectrofotómetro UV VIS | NMX-AA-077-SCFI-2001   | 1.0 mg/L                 |

local de la región de Morelia los pozos presentan niveles elevados de hierro y manganeso, se descartó tal opción. Otros como el polímero no fueron tan efectivos, obteniendo únicamente eficiencias no mayores al 40% de remoción.

La elección de reactivos se determinó en las últimas iteraciones que dieron resultados similares a los de la **Tabla 2**, con base en los resultados, y en el resto de las pruebas, se determinó que, para este caso particular, no se encontró una diferencia significativa entre usar un agente oxidante, por lo que quedó descartado su uso. Aunque no se midieron parámetros redox directos, la ausencia de diferencias importantes al emplear el agente oxidante sugiere que el arsénico presente se encontraba mayoritariamente en su forma oxidada. Por otro lado, la medición redox podría no ser representativa ante la presencia significativa de concentraciones de hierro y manganeso, donde pueden dominar la señal de ORP medida y reduciendo su utilidad para describir la especiación del arsénico (Ngai, 2002).

En cuanto a los reactivos y dosis adecuadas, se optaron por utilizar 6 mg/L de Sulfato de aluminio y 2 mg/L de Policloruro de Aluminio.

### Aplicación del proceso a los pozos de interés.

Se aplicó el proceso completo a nuevas pruebas de jarras, manteniendo los reactivos y dosis iguales y variando en los filtros, destinando un filtro a 2 jarras. Los resultados se muestran en la **Tabla 3**.

Es notable que la menor remoción es conseguida con el Filtro AS, mientras que tanto los Filtros CA y CAZ lograron las mayores remociones, habiendo poca diferencia entre el uso de uno y otro, por lo que se puede concluir que el carbón activado es fundamental para ser parte del material filtrante, mientras que la zeolita puede contribuir a mejorar la remoción (**Figura 1**).

### Análisis de parámetros complementarios.

Aunque la diferencia entre los tratamientos no llega a ser significativa, la adición del resto de parámetros será

**Tabla 2.** Prueba de jarras con los reactivos propuestos.

| Jarra | NaClO (mg/L) | Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (mg/L) | PAC (mg/L) | Filtro | Arsénico (mg/L) |
|-------|--------------|--------------------------------------------------------|------------|--------|-----------------|
| 0     | 0            | 0                                                      | 2          |        | 0.019           |
| 1     | 1.3          | 6                                                      | 2          |        | <0.002          |
| 2     | 1.3          | 6                                                      | 2          | Sí     | <0.002          |
| 3     | 0            | 6                                                      | 2          | Sí     | <0.002          |
| 4     | 0            | 6                                                      | 2          | Sí     | <0.002          |

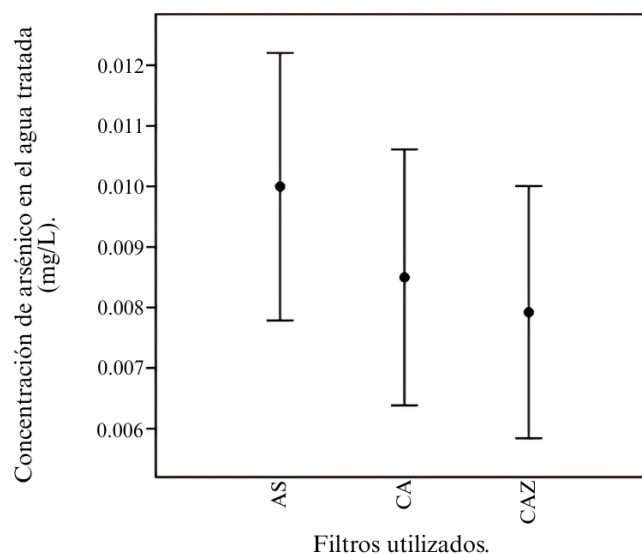


**Figura 1.** Gráfico de media y bigotes para cada filtro utilizando en la remoción de arsénico.

determinante para definir qué filtro puede ser mejor para mantener los niveles en norma, por lo que se concluyen con los siguientes resultados, donde se comparan las concentraciones o valores obtenidos (eje Y) de cada pozo (A-M) al pasar por el filtro AS (Arena sílica), CA (Carbón activado) y CAZ (Arena sílica, carbón activado y zeolita).

A partir de estos resultados se concluye que cualquier filtro puede ser utilizado sin comprometer a los parámetros que podían verse afectados por el proceso (**Tabla 4**). Así mismo, se determinó que no hay relación entre la presencia

**Tabla 3.** Resultados de remoción de arsénico tras el proceso de coagulación-floculación-filtración.

| Pozo             | As Inicial (mg/L)      | As después de cada filtro (mg/L) |                      |                                               |
|------------------|------------------------|----------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------|
|                  | As <sub>0</sub> (mg/L) | Arena Sílica (AS)                | Carbón Activado (CA) | Carbón activado, Arena Sílica y Zeolita (CAZ) |
| A <sub>1,2</sub> | 0.013                  | 0.009<br>0.008                   | 0.006<br>0.008       | 0.007<br>0.008                                |
| B <sub>1,2</sub> | 0.01                   | 0.009<br>0.008                   | 0.009<br>0.008       | 0.007<br>0.008                                |
| C <sub>1,2</sub> | 0.007                  | 0.005<br>0.005                   | 0.004<br>0.004       | 0.004<br>0.004                                |
| D <sub>1,2</sub> | 0.023                  | 0.019<br>0.02                    | 0.02<br>0.007        | 0.009<br>0.02                                 |
| E <sub>1,2</sub> | 0.007                  | 0.008<br>0.007                   | 0.006<br>0.006       | 0.005<br>0.006                                |
| F <sub>1,2</sub> | 0.007                  | 0.009<br>0.009                   | 0.008<br>0.008       | 0.006<br>0.006                                |
| G <sub>1,2</sub> | 0.01                   | 0.016<br>0.016                   | 0.014<br>0.015       | 0.005<br>0.014                                |
| H <sub>1,2</sub> | 0.018                  | 0.008<br>0.009                   | 0.008<br>0.008       | 0.007<br>0.007                                |
| I <sub>1,2</sub> | 0.01                   | 0.006<br>0.004                   | 0.002<br><0.002      | 0.005<br><0.002                               |
| J <sub>1,2</sub> | 0.01                   | 0.002<br>0.008                   | <0.002<br>0.007      | 0.006<br>>0.002                               |
| K <sub>1,2</sub> | 0.01                   | 0.006<br>0.007                   | 0.006<br>0.006       | 0.006<br>0.006                                |
| L <sub>1,2</sub> | 0.009                  | 0.008<br>0.008                   | 0.007<br>0.007       | 0.007<br>0.023                                |
| M <sub>1,2</sub> | 0.03                   | 0.024<br>0.022                   | 0.023<br>0.02        | 0.023<br>0.02                                 |

<sub>1</sub> Primera prueba del pozo.

<sub>2</sub> Segunda prueba del mismo pozo.

de arsénico con la presencia de fluoruros en el acuífero de Morelia. Aunque no hay diferencia significativa, el filtro CAZ presentó los resultados óptimos.

La diferencia entre los filtros CA y CAZ es mínimo (**Figura 2**), pero logran cumplir con la remoción del arsénico, a excepción de los pozos D, G y M, que requirieron de dosis de mayor cantidad para asegurar la remoción.

El parámetro determinante para elegir el Filtro CAZ como el más eficiente es el Aluminio, que puede mantenerse a niveles dentro de los permisibles (0.2 mg/L) con la remoción que consigue este filtro, sin embargo, es importante mantener el monitoreo recomendado para este elemento o modificar la combinación establecida para evitar que se salga de rango (**Figura 3**). Pese a que las diferencias son mínimas entre el uso de los filtros, en la totalidad de los parámetros medidos el filtro que logra mejores resultados es el que contiene arena sílica, carbón activado y

zeolita, dando mención especial a estos dos últimos materiales que logran tener afinidad en la remoción de turbidez, color, arsénico y aluminio. Por tanto, un filtro construido con base de estos dos materiales puede garantizar remover el arsénico dentro del agua de las fuentes de abastecimiento subterráneas, a su vez que se tenga presente la caracterización de todos los parámetros de importancia para mantenerse dentro de los límites permisibles de la norma de agua potable.

## Discusión

Considerando el sistema de tratamiento propuesto, en el que se utiliza un coagulante y floculante, se usaron bajas dosis de reactivos, en comparación con otros estudios: Aviles (2016) administró 80 mg/L de sulfato de aluminio,

**Tabla 4.** Resultados de los parámetros complementarios tras el proceso de coagulación-floculación-filtración.

| Resultados                 | Filtro de Arena<br>Sílica (AS) | Filtro de Carbón<br>Activado (CA) | Filtro de Arena sílica, Carbón<br>activado y zeolita (CAZ) | Observaciones                                 |
|----------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Color (Pt. Co.)            | 7                              | 6                                 | 6                                                          | Mayoría debajo del límite de detección.       |
| Turbiedad (UNT)            | 0.8                            | 0.7                               | 0.5                                                        | Mayoría debajo del límite de detección.       |
| pH                         | 7.7                            | 7.6                               | 7.6                                                        | Dentro de rango.                              |
| Conductividad<br>Eléctrica | 786                            | 771                               | 745                                                        | Valores ligeramente altos para algunos pozos. |
| Fluoruros (mg/L)           | <0.2                           | <0.2                              | <0.2                                                       | Debajo del límite de detección.               |

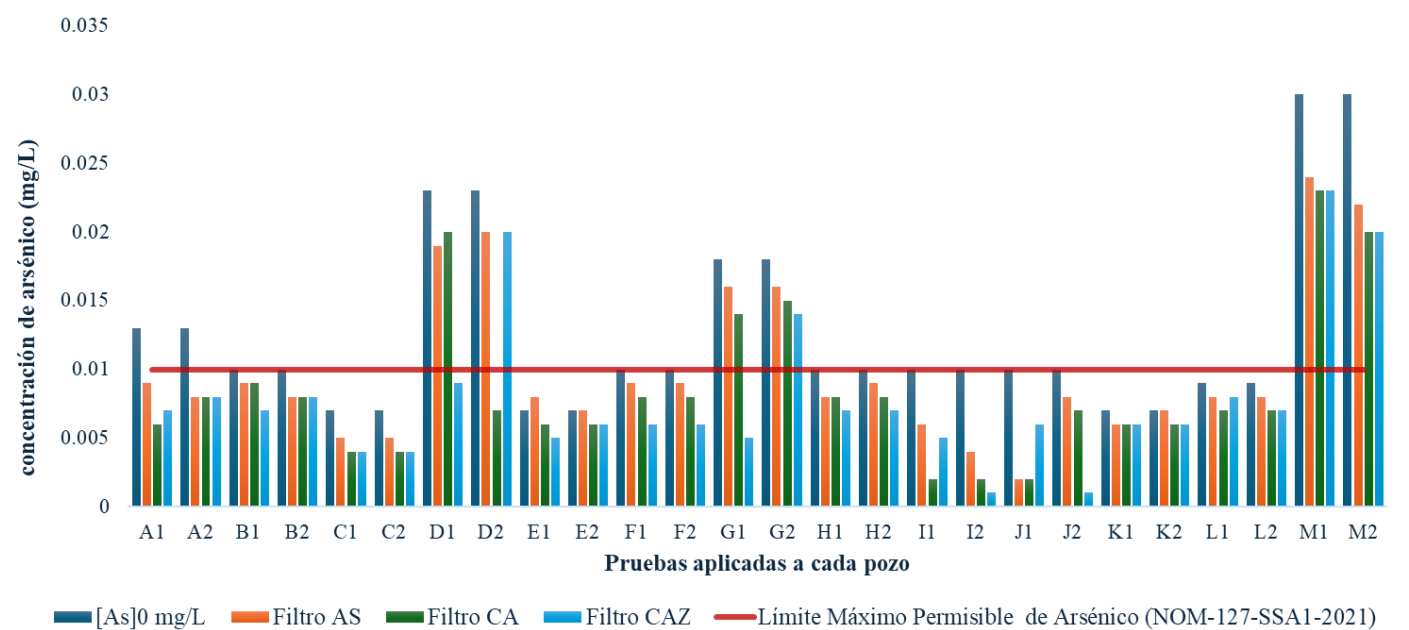


**Figura 2.** Gráfica comparativa de concentraciones de arsénico con cada tratamiento.

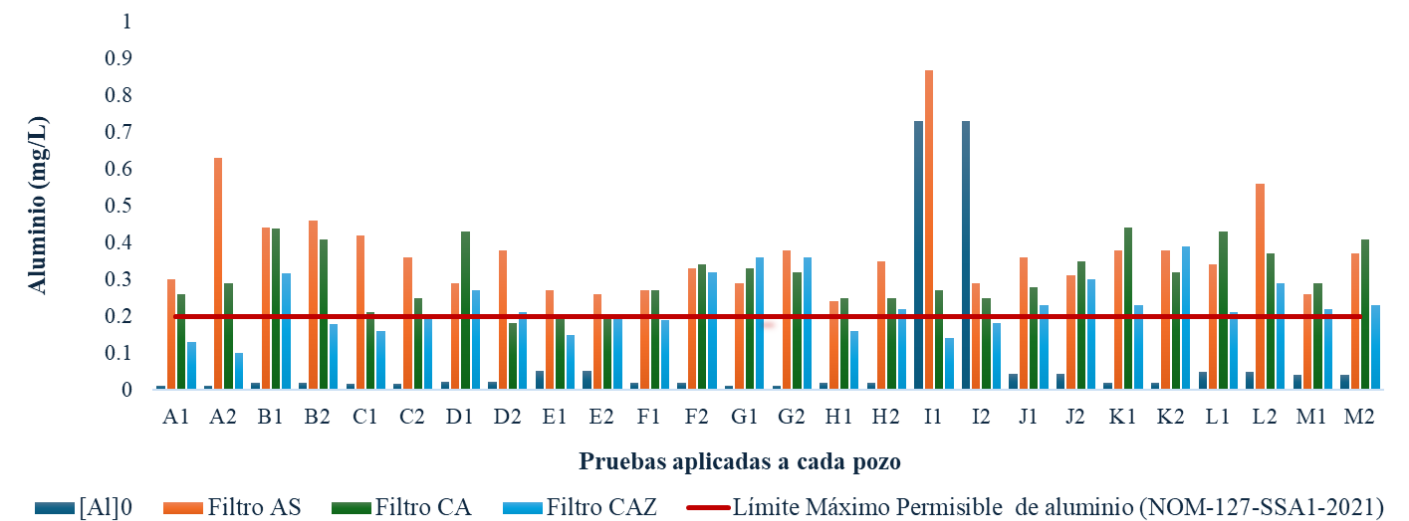


**Figura 3.** Gráfica comparativa de concentraciones de Aluminio con cada tratamiento.

en una combinación con el uso de arcillas y oxidantes, lo que le garantizó la remoción del 93% pero, no cumplió en normativa 63 con todos los parámetros, destacando el nivel elevado de aluminio residual, como ocurrió en la presente investigación; Por otro lado, Estrada y Szarata (2016) utilizaron 25 mg/L en un proceso de coagulación-floculación-filtración, alcanzando una remoción promedio del 70%. Francisca y Carro (2014), usaron 50 mg/L, además de oxidantes y arcillas, y obtuvieron eficiencias de remoción de entre 80 y 95%, no obstante que utilizaron cloruro férrico en los casos en los que la concentración inicial de arsénico era mayor. Sancha (1999), quien en sus primeros estudios uso sulfato de aluminio como coagulante, después optó por el uso de cloruro férrico a 30 mg/L, obteniendo mejores resultados. En este caso en particular, la alternativa del cloruro férrico quedó descartada por las concentraciones de hierro presentes en el agua cruda de las fuentes de abastecimiento.

Pocos estudios mencionan los demás parámetros de calidad del agua. Algunos casos mencionan que algunos parámetros como pH, turbiedad y color se ven favorecidos con el uso de filtros al final del tratamiento, como Estrada y Szarata, (2016), quienes además destacaron el uso de filtros como una mejor alternativa ante el proceso de sedimentación.

En este estudio, se optó por manejar bajas dosis de los reactivos con tal de cumplir con la remoción del arsénico y mantenerlo por debajo de los límites normativos, sin embargo, es igual de necesario mantener un monitoreo continuo de los parámetros que podrían verse afectados por el mismo proceso, como el aluminio residual, por lo que será importante establecer mantenimientos programados de los filtros para que estos mantengan una operación adecuada y mantener este parámetro dentro de norma.

## Conclusiones

El sistema de tratamiento probado para tratar las fuentes de abastecimiento de aguas subterráneas en la ciudad de Morelia cumple en la remoción del arsénico y tiene un alcance de aplicación real hacia otras fuentes de abastecimiento que presenten este problema de contaminación, con la instalación de dosificadores de reactivos y filtros dentro del sistema de cada pozo.

Este proceso de oxidación-coagulación-floculación-filtración es de fácil operación sobre caudales que no exceden los 10 L/s, y rentable por las dosis bajas de reactivos que requiere. Con el uso de sulfato de aluminio a 6 mg/L y policloruro de aluminio a 2 mg/L en pruebas de jarras a escala de laboratorio, se garantiza la remoción de

arsénico con una eficiencia que puede alcanzar el 90% y mantiene al agua dentro de los parámetros establecidos en la NOM-127-SSA1-2021 (SS, 2022).

Finalmente, su aplicación es considerada accesible y rentable a comparación de la mayoría de las tecnologías aplicadas, al requerir de pocos equipos y reactivos, garantizando resultados seguros con posibilidad de aplicación a en otras fuentes de abastecimiento afectadas por el mismo contaminante.

## Agradecimientos

Agradecimientos especiales al Organismo Operador de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Morelia (OOAPAS) por contribuir en el financiamiento de este proyecto.

## Referencias

Arreguín F, Chávez R, Soto Navarro P, Smedley P (2009). Una revisión de la presencia de arsénico en el agua subterránea en México. *Tlaloc AMH* 45:15-31.

Aviles M, Pardón M (2016). Remoción de arsénico en agua mediante coagulación-floculación a nivel domiciliario. [https://www.researchgate.net/publication/237747537\\_REMOCION\\_DE\\_ARSENICO\\_DE\\_AGUA\\_MEDIANTE\\_COAGULACION-FLOCULACION\\_A\\_NIVEL\\_DOMICILIARIO](https://www.researchgate.net/publication/237747537_REMOCION_DE_ARSENICO_DE_AGUA_MEDIANTE_COAGULACION-FLOCULACION_A_NIVEL_DOMICILIARIO)

Borjon S, Soto E, Salazar J, Dávila N (2021). Remoción de arsénico en agua subterránea mediante procesos de adsorción. *Química Hoy* 10(4):30-33.

CONAGUA (2019). Agua en el Mundo. <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/agua-en-el-mundo> [Consultado el 15 de marzo de 2024].

CONAGUA (2023). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Morelia-Queréndaro (1602), Estado de Michoacán. Subdirección general técnica, gerencia de cuencas.

D' Ambrosio M (2005). Evaluación y selección de tecnologías disponibles para la remoción de arsénico. [https://www.produccion-animal.com.ar/agua\\_bebida/30-tecnologias\\_remocion\\_arsenico.pdf](https://www.produccion-animal.com.ar/agua_bebida/30-tecnologias_remocion_arsenico.pdf)

De la Rosa P (2018). Efectos Toxicológicos: Arsénico. *Visión criminológica-criminalística* 6(24):36-43. <https://revista.cleu.edu.mx/new/descargas/1901/revista/Revista24.pdf>

Esparza C (2006). Remoción del arsénico en el agua para bebida y biorremediación de suelos. In Natural Arsenic in Groundwaters of Latin America. <http://www.ingenieroambiental.com/4014/remocion-agua.pdf>

Francisca F, Carro M (2014). Remoción de arsénico en agua mediante

procesos de coagulación-floculación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental. Revista internacional de contaminación ambiental* 30(2):177–190. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-49992014000200005](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992014000200005)

Guevara M, Saavedra O, Reupo J, Gamarra J, Vásquez A (2022). Sistema de osmosis inversa en remoción de arsénico de agua subterránea en Pacora. *UCV Hacer* 11(4):11-17. <https://revistas.ucv.edu.pe/index.php/ucv-hacer/article/view/2331>

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (2019). Aguas subterráneas. <https://www.gob.mx/imta/articulos/aguas-subterranas> [Consultado el 1 de marzo de 2024].

Martínez M, Aguilera E, Martínez A (2018). Remoción de arsénico de agua potable mediante adsorción sobre óxido y oxihidróxidos de hierro. *CienciAcierta*.

Ngai WK (2002). *Arsenic contamination of drinking water in Nepal: an overview and possible mitigation strategies* (Master's thesis). Massachusetts Institute of Technology (MIT). <https://web.mit.edu/watsan/Docs/Student%20Theses/Nepal/Ngai2002.pdf>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (2023). El agua es vida, el agua nutre. <https://www.fao.org/3/cc6758es/cc6758es.pdf>

Organización Mundial de la Salud (2022). “Arsénico”. Who.int; World Health Organization. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/arsenic> [Consultado el 4 de abril de 2024]

Ortega-Guerrero MA (2009). Presencia, distribución, hidrogeoquímica y origen de arsénico, fluoruro y otros elementos traza disueltos en agua subterránea, a escala de cuenca hidrológica tributaria de Lerma-

Chapala, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 26(1):143-161. <https://scielo.org.mx/pdf/rmcg/v26n1/v26n1a12.pdf>

Sancha AM (1999). Full-scale Application of Coagulation Processes for Arsenic Removal in Chile: A Successful Case Study. In: Chappell WR, Abernathy CO, Calderon RL (eds) *Arsenic Exposure and Health Effects III*. Elsevier Science Ltd, Oxford, pp 373–378. doi:10.1016/B978-008043648-7/50042-X

Sáenz C (2019). Humedales de tratamiento para remoción de arsénico del rechazo de un sistema de purificación de agua por ósmosis inversa. [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Chihuahua]. <http://repositorio.uach.mx/220/1/Tesis.pdf>

Secretaría de Salud (SS) (2022). “Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano, límites permisibles de la calidad del agua”. Diario Oficial de la Federación. México. [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022#gsc.tab=0). [Consultado el 04 de abril de 2024].

Secretaría de Salud (2005). Norma Oficial Mexicana NOM-230-SSA1-2002, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano, requisitos sanitarios que se deben cumplir en los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua. Procedimientos sanitarios para el muestreo. Diario Oficial de la Federación.

Smith R, Knight R, Fendorf S (2018). Overpumping leads to California groundwater arsenic threat. *Nature Communications* 9(1):2089. doi:10.1038/s41467-018-04475-3

Vitela A (2011). Remoción de arsénico por medio de carbón activado modificado con nanopartículas de hidro(óxidos) de hierro. [Tesis de Maestría, Instituto potosino de investigación científica y tecnológica, A.C.]. Incluye gráficas.